

УДК 621.787:539.319

Сазанов В. П., Шадрин В. К., Микушев Н. Н., Злобин А. С., Письмаров А. В.**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ТЕРМОУПРУГОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ УПРОЧНЁННОЙ ДЕТАЛИ**

В основе определения остаточных напряжений после пластического деформирования деталей лежит известная в теории пластичности теорема о разгрузке. В соответствии с этой теоремой, впервые сформулированной Генки в 1924 году [1], остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упруго-пластическом теле и теми напряжениями, которые создавались бы в нём при предположении об идеально упругом материале. С физической точки зрения образование остаточных напряжений связано с необратимыми (остаточными) изменениями объёма. Эти изменения объёма, оставшиеся после разгрузки, и вызывают остаточные напряжения.

Рассмотрим тело, в материале которого произошли необратимые изменения линейных размеров. Эти изменения могли произойти вследствие пластических деформаций, фазовых превращений, термического, химико-термического, радиационного и других воздействий. По известным размерам свободных от связей элементов тела до и после воздействия определяются так называемые первоначальные деформации [1]. Очевидно, что компоненты тензора первоначальных деформаций не удовлетворяют условиям совместности Сен-Венана [2]. Следовательно, в сплошной среде эти деформации не могут быть реализованы, так как в ней могут существовать и находиться в равновесии только совместные деформации. Таким образом, после появления первоначальных деформаций в теле возникают препятствующие нарушению условий сплошности силы, составляющие самоуравновешенное поле собственных напряжений. Такие напряжения называются остаточными и им соответствуют деформации, которые измеряются на практике с помощью различных методов и способов. При этом считается, что остаточные напряжения не превышают предела текучести материала и вызванная ими деформация является упругой.

Если необратимые линейные изменения тела по всем направлениям будут одинаковыми, то возникает объёмная деформация, имеющая много общего с температурной деформацией. Использование этой связи первоначальных деформаций с термоупругостью материала и позволяет применять современные расчётные комплексы, реализующие метод конечных элементов в форме перемещений, при решении задач о распределениях остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях сложной формы.

В качестве примера было рассмотрено решение задачи по расчёту остаточных напря-

жений в упрочнённом поверхностном слое толщиной 0,5 мм сплошного цилиндра диаметром 10 мм с первоначальной изотропной объёмной деформацией, постоянной по всем направлениям. Аналитическое решение этой задачи приведено в работе Биргера И.А. [1], которое основано на использовании следующих уравнений теории упругости, записанных в цилиндрической системе координат:

$$\sigma_r = E\{\varepsilon_r - \mu(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z)\} + \varepsilon_{0r}; \quad \sigma_\theta = E\{\varepsilon_\theta - \mu(\varepsilon_r + \varepsilon_z)\} + \varepsilon_{0\theta}; \quad \sigma_z = E\{\varepsilon_z - \mu(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta)\} + \varepsilon_{0z},$$

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – радиальные, окружные и осевые остаточные напряжения; $\varepsilon_{0r}, \varepsilon_{0\theta}, \varepsilon_{0z}$ – радиальные, окружные и осевые первоначальные деформации; E – модуль продольной упругости материала; μ – коэффициент Пуассона.

В поверхностном кольцевом слое цилиндра толщиной 0,5 мм имеется остаточная первоначальная деформация

$$\varepsilon_{0r} = \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0z} = \varepsilon_0.$$

Для расчёта были приняты следующие численные значения параметров: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $\varepsilon_0 = 0,001$.

Для решения задачи численным методом был использован расчётный комплекс PATRAN/NASTRAN. Конечно-элементная модель в осесимметричной постановке представляет собой осевое сечение четверти цилиндра с наложением соответствующих граничных условий. Принятая длина расчётной области цилиндра исключает влияние краевых зон для сечения, в котором значения компонентов остаточных напряжений сравниваются с их значениями для случая аналитического решения. При моделировании был использован треугольный шестиузловой осесимметричный конечный элемент типа 2D-Solid. Первоначальная деформация $\varepsilon_0 = 0,001$ в поверхностном слое моделировалась как температурное расширение тела, при этом коэффициент линейного расширения $\alpha = 0,00001 \frac{1}{град}$, перепад температуры относительно внутренней области составлял $\Delta T = 100^\circ C$.

Результаты расчётов распределения остаточных напряжений по поперечному сечению цилиндра аналитическим и численным методами показали, что аналитический и численный методы дают одинаковые результаты. Поэтому метод термоупругости может применяться для моделирования остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых деталях.

Использование расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN позволяет решать методами термоупругости задачи расчёта распределения остаточных напряжений и для случаев,

когда первоначальные деформации по направлениям имеют различные значения (в том числе и знаки). Для этого в конечно-элементных моделях необходимо применять 3D-ортотропный материал, у которого механические характеристики (модули продольной и поперечной упругости, коэффициенты Пуассона) по всем направлениям системы координат одинаковые, а коэффициенты линейного расширения α по этим направлениям имеют различные значения:

$$\varepsilon_{0r} = \alpha_r \cdot \Delta T ; \varepsilon_{0\theta} = \alpha_\theta \cdot \Delta T ; \varepsilon_{0z} = \alpha_z \cdot \Delta T ,$$

где $\alpha_r, \alpha_\theta, \alpha_z$ - коэффициенты линейного расширения в радиальном, окружном и осевом направлениях цилиндрической системы координат.

Из практических методов определения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя наиболее точными являются механические методы [3, 4], при которых из исследуемой детали вырезаются образцы в виде полосок, колец, пластинок и другой формы. Далее производится измерение деформаций при удалении поверхностных слоёв с остаточными напряжениями. Для перехода от деформаций, измеренных при удалении слоёв образца, к зависимости остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя применяются методики, основанные на известных решениях теории упругости для стержней, пластинок, колец.

Для контроля качества упрочнения деталей методами поверхностного пластического деформирования, но с сохранением исследуемой детали, на практике применяется аналогичные методики с удалением упрочнённого поверхностного слоя на пластинках и кольцах, вырезанных из образцов-свидетелей. Образцы-свидетели проходят технологический процесс упрочнения вместе с обрабатываемой деталью. Следует однако отметить, что этот способ контроля качества упрочнения является приближённым, так как реальная деталь имеет сложную форму и в местах концентрации наблюдается значительное перераспределение остаточных напряжений, а для количественной оценки влияния упрочнения на характеристики сопротивления усталости необходимо знать достаточно точное распределение остаточных напряжений в поверхностном слое опасного сечения детали [3–6].

Применение метода термоупругости с использованием конечно-элементного моделирования и расчётных комплексов типа PATRAN/NASTRAN позволяет значительно расширить возможности исследования и практического определения распределения остаточных напряжений в деталях сложной геометрической формы, подвергаемых методам поверхностного пластического деформирования (ППД) совместно с образцами-свидетелями. Предлагаемый метод исследования основан на известном в теории и практике механики

остаточных напряжений положении о том, что обрабатываемые методами ППД деталь и образец-свидетель простой формы, имеющий по отношению к детали определённые соотношения геометрических размеров [7], получают одинаковые первоначальные деформации [8].

На основании изложенного предлагается следующий порядок определения распределений остаточных напряжений в поверхностно упрочнённой детали по результатам исследования образца-свидетеля, обработанного одновременно с деталью:

- определение распределения остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя образца-свидетеля (например, методом колец и полосок);
- определение на конечно-элементной модели образца-свидетеля первоначальных деформаций в виде температурных зависимостей по направлениям осей системы координат (при установленном экспериментально соотношении между их компонентами для данного технологического процесса упрочнения);
- расчёт распределения остаточных напряжений на конечно-элементной модели детали по полученным первоначальным деформациям (методом термоупругости).

Таким образом, полученные разработанным в настоящем исследовании методом результаты расчётов распределения остаточных напряжений в поверхностно упрочнённой детали позволят в дальнейшем решить следующие важные для практики задачи:

- прогнозирование приращения предела выносливости детали за счёт поверхностного упрочнения;
- выбор наиболее оптимальных, по сопротивлению усталости, режимов технологического процесса упрочнения детали.

Решение этих задач приведёт к сокращению длительных и дорогостоящих испытаний деталей машин на усталость.

Библиографический список

- 1 Биргер, И.А. Остаточные напряжения [Текст] / И.А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
- 2 Стружанов, В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоении двухслойных полос [Текст] / В.В. Стружанов // Вестник СамГТУ. Сер.: физ.-мат. науки, 2010. – №5(21). – С. 55-63.
- 3 Иванов, С.И. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов, Г.В. Коновалов, Б.В. Минин // – М.: МАП (Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации»), 1992. – 191 с.
- 4 Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых

деталей по остаточным напряжениям: монография [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012 . – 125 с.

- 5 Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
- 6 Радченко, В.П. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести [Текст] / В.П. Радченко, О.С. Афанасьева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: физ.-мат. науки, 2009. – №2(19). – С. 264-268.
- 7 Иванов, С.И. Об изучении остаточного напряжённого состояния детали путём исследования образцов [Текст] / С.И. Иванов, К.Ф. Митряев / Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ, 1971. – Вып.53. – С. 115-121.
- 8 Павлов, В.Ф. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям: монография [Текст] / В.Ф. Павлов, А.К. Столяров, В.С. Вакулюк, В.А. Кирпичёв. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2008. – 124 с.